

## ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 624.139

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(48-51)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТИПА “ГЕТ”  
С УГЛЕКИСЛОТОЙ И АММИАКОМ В КАЧЕСТВЕ ХЛАДАГЕНТА

Г.В. Аникин, Д.В. Мочалов

Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,  
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; anikin@ikz.ru, Dima\_72m@mail.ru

Приведено сравнение мощностей установок типа “ГЕТ”, работающих на хладагентах – углекислоте и аммиаке. Показано, что мощность установки с углекислотой всегда выше мощности установки с аммиаком.

Многолетнемерзлые грунты, система “ГЕТ”, сезонное охлаждающее устройство, хладагент, аммиак, углекислота

ESTIMATING THE EFFICIENCY OF HET SYSTEMS  
USING CARBON DIOXIDE AND AMMONIA AS REFRIGERANTS

G. V. Anikin, D. V. Mochalov

Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS,  
86, Malygina str., Tyumen, 625026, Russia; anikin@ikz.ru, Dima\_72m@mail.ru

Results of the comparison made between total capacities of horizontal evaporator tube (HET) systems (Russian brand name GET systems) working on such refrigerants as carbon dioxide and ammonia has revealed that the total capacity of HET systems using carbon dioxide is always higher, against ammonia-based systems.

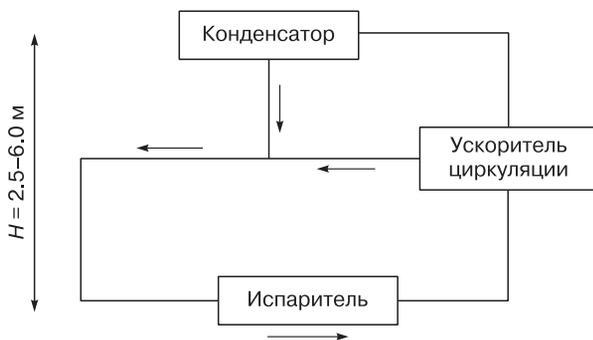
Permafrost, HET, seasonal refrigeration system, refrigerant, ammonia, carbon dioxide

## ВВЕДЕНИЕ

Сезонные горизонтальные естественно-трубчатые охлаждающие устройства (“ГЕТ” устройства) применяются для поддержания отрицательных температур в многолетнемерзлых грунтах оснований в течение зимнего периода. Принципиальная схема устройства приведена на рисунке. Математическая модель, описывающая работу установки “ГЕТ”, приведена в [Аникин, 2009]. Математическое моделирование установки “ГЕТ” с аммиаком описано в [Аникин и др., 2011]. В качестве рабочего тела для таких систем могут использоваться различные хладагенты. Однако не

все хладагенты обеспечивают работоспособность системы. В статье [Аникин, Спасенникова, 2014] проанализировано несколько хладагентов: диоксид углерода, аммиак, фреон 22, фреон 12, фреон 142, фреон 21, фреон 11, хлористый метилен, ацетон, фреон 113, метанол. Анализ хладагентов был проведен для Ванкорского месторождения, значения температуры воздуха взяты для метеостанции Игарка. Согласно выводам этой статьи, такие хладагенты, как хлористый метилен, ацетон, фреон 113 и метанол, не обеспечивают работоспособность установки в течение зимнего периода. Большую эффективность показали диоксид углерода и аммиак.

В настоящее время для замораживания грунтов используются сезонные охлаждающие устройства (СОУ) производства НПО “Фундамент-СтройАкос”, хладагентом в которых является аммиак. В работе [Мельников и др., 2017] установлены верхние и нижние тепловые нагрузки для системы “ГЕТ”, работающей на аммиаке. В Институте криосферы Земли СО РАН разработаны сезонные охлаждающие устройства на диоксиде углерода. Данные устройства начинают работать, когда грунт теплее атмосферы на десятки доли градуса (разница температур практически нулевая), в то



Принципиальная схема устройства “ГЕТ”.

© Г.В. Аникин, Д.В. Мочалов, 2020

Отношение мощностей установки для углекислого газа и аммиака при заданной температуре

H, м	$\Delta_{CO_2}$	$\Delta_{ам}$	$t_{гp} - t_{в}$									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>Температура конденсатора -30 °C</i>												
2.5	0.54	2.86	∞	∞	17.17	3.02	2.08	1.74	1.56	1.45	1.38	1.32
3.0	0.65	3.43	∞	∞	∞	5.85	2.77	2.08	1.78	1.61	1.50	1.42
3.5	0.76	4.00	∞	∞	∞	13 526.82	4.24	2.62	2.08	1.81	1.65	1.54
4.0	0.87	4.57	∞	∞	∞	∞	9.63	3.59	2.52	2.08	1.84	1.68
4.5	0.98	5.14	∞	∞	∞	∞	∞	5.85	3.24	2.46	2.08	1.86
5.0	1.09	5.71	-	∞	∞	∞	∞	17.17	4.60	3.02	2.41	2.08
5.5	1.20	6.29	-	∞	∞	∞	∞	∞	8.12	3.97	2.87	2.37
6.0	1.31	6.86	-	∞	∞	∞	∞	∞	39.74	5.85	3.59	2.77
6.5	1.42	7.43	-	∞	∞	∞	∞	∞	∞	11.51	4.83	3.34
7.0	1.52	8.00	-	∞	∞	∞	∞	∞	∞	13 526.82	7.47	4.24
7.5	1.63	8.57	-	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	17.17	5.85
8.0	1.74	9.14	-	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	9.63
8.5	1.85	9.71	-	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	28.47
<i>Температура конденсатора -20 °C</i>												
2.5	0.42	1.93	∞	22.43	2.41	1.73	1.49	1.37	1.30	1.25	1.21	1.19
3.0	0.50	2.32	∞	∞	3.65	2.08	1.68	1.49	1.39	1.32	1.27	1.24
3.5	0.58	2.70	∞	∞	8.09	2.63	1.92	1.64	1.49	1.40	1.34	1.29
4.0	0.67	3.09	∞	∞	∞	3.65	2.27	1.83	1.62	1.49	1.41	1.35
4.5	0.75	3.47	∞	∞	∞	6.17	2.78	2.08	1.77	1.60	1.49	1.42
5.0	0.83	3.86	∞	∞	∞	22.43	3.65	2.41	1.96	1.73	1.59	1.49
5.5	0.91	4.24	∞	∞	∞	∞	5.41	2.90	2.21	1.89	1.70	1.58
6.0	1.00	4.63	∞	∞	∞	∞	10.83	3.65	2.53	2.08	1.83	1.68
6.5	1.08	5.02	-	∞	∞	∞	∞	5.00	2.98	2.32	1.99	1.79
7.0	1.16	5.40	-	∞	∞	∞	∞	8.09	3.65	2.63	2.18	1.92
7.5	1.25	5.79	-	∞	∞	∞	∞	22.43	4.75	3.05	2.41	2.08
8.0	1.33	6.17	-	∞	∞	∞	∞	∞	6.86	3.65	2.71	2.27
8.5	1.41	6.56	-	∞	∞	∞	∞	∞	12.69	4.57	3.11	2.50
<i>Температура конденсатора -10 °C</i>												
2.5	0.32	1.35	∞	2.58	1.62	1.39	1.28	1.22	1.18	1.15	1.13	1.12
3.0	0.38	1.62	∞	4.25	1.90	1.52	1.37	1.28	1.23	1.19	1.17	1.15
3.5	0.45	1.89	∞	14.01	2.30	1.68	1.46	1.35	1.28	1.24	1.20	1.18
4.0	0.51	2.16	∞	∞	2.96	1.90	1.58	1.43	1.34	1.28	1.24	1.21
4.5	0.57	2.43	∞	∞	4.25	2.18	1.72	1.52	1.41	1.33	1.28	1.25
5.0	0.64	2.70	∞	∞	7.84	2.58	1.90	1.62	1.48	1.39	1.33	1.28
5.5	0.70	2.97	∞	∞	73.20	3.20	2.12	1.75	1.56	1.45	1.38	1.32
6.0	0.77	3.24	∞	∞	∞	4.25	2.40	1.90	1.66	1.52	1.43	1.37
6.5	0.83	3.51	∞	∞	∞	6.45	2.80	2.08	1.77	1.60	1.49	1.41
7.0	0.89	3.78	∞	∞	∞	14.01	3.36	2.30	1.90	1.68	1.55	1.46
7.5	0.96	4.05	∞	∞	∞	∞	4.25	2.58	2.05	1.78	1.62	1.52
8.0	1.02	4.32	-	∞	∞	∞	5.84	2.96	2.23	1.90	1.70	1.58
8.5	1.08	4.59	-	∞	∞	∞	9.50	3.48	2.45	2.03	1.79	1.65
<i>Температура конденсатора 0 °C</i>												
2.5	0.25	0.97	29.73	1.71	1.36	1.24	1.18	1.15	1.12	1.10	1.09	1.08
3.0	0.29	1.17	∞	2.05	1.48	1.31	1.23	1.18	1.15	1.13	1.11	1.10
3.5	0.34	1.36	∞	2.61	1.62	1.39	1.28	1.22	1.18	1.15	1.13	1.12
4.0	0.39	1.56	∞	3.65	1.81	1.48	1.34	1.26	1.21	1.18	1.16	1.14
4.5	0.44	1.75	∞	6.34	2.05	1.58	1.40	1.31	1.25	1.21	1.18	1.16
5.0	0.49	1.95	∞	29.73	2.39	1.71	1.48	1.36	1.29	1.24	1.21	1.18

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5.5	0.54	2.14	∞	∞	2.87	1.86	1.56	1.42	1.33	1.27	1.23	1.20
6.0	0.59	2.34	∞	∞	3.65	2.05	1.66	1.48	1.38	1.31	1.26	1.23
6.5	0.64	2.53	∞	∞	5.07	2.29	1.77	1.55	1.42	1.35	1.29	1.25
7.0	0.69	2.73	∞	∞	8.53	2.61	1.90	1.62	1.48	1.39	1.33	1.28
7.5	0.74	2.92	∞	∞	29.73	3.03	2.05	1.71	1.54	1.43	1.36	1.31
8.0	0.79	3.12	∞	∞	∞	3.65	2.24	1.81	1.60	1.48	1.40	1.34
8.5	0.84	3.31	∞	∞	∞	4.61	2.47	1.92	1.67	1.53	1.44	1.37

Примечание. Знак “∞” указывает, что установка с аммиаком не работает; знак “-” означает, что установка не работает ни с углекислотой, ни с аммиаком.  $H$  – высота подъема конденсатора над испарителем, м;  $\Delta_{CO_2}$ ,  $\Delta_{ам}$  – разность температур конденсатора и грунта для установки на углекислоте и аммиаке соответственно, °С;  $t_{гр}$  – температура грунта, °С;  $t_{в}$  – температура воздуха, °С. Обычно  $H$  находится в диапазоне от 2.5 до 6.0 м ( $H < 2.5$  м не встречается на практике); для установок НПО “ФундаментСтройАркас”  $H$  составляет 6 м.

время как устройства на аммиаке начинают работать, когда грунт теплее атмосферы на несколько градусов [Аникин, Спасенникова, 2014]. Таким образом, время работы СОУ на диоксиде углерода в течение зимнего сезона существенно больше времени работы СОУ с аммиаком в качестве хладагента. Мощность установки, работающей на диоксиде углерода, может быть значительно больше мощности установки на аммиаке.

### РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Мощность установки задается следующим выражением [Аникин, Спасенникова, 2014]:

$$W = (t_k - t_b) S \eta \alpha = ((t_k - t_{гр}) + (t_{гр} - t_b)) S \eta \alpha, \quad (1)$$

где  $t_k$  – температура конденсатора;  $t_{гр}$  – температура грунта на границе с трубой испарителя;  $t_b$  – температура воздуха;  $S$  – суммарная площадь всех ребер;  $\eta$  – коэффициент эффективности ребер;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи ребер;

$$W_{ам} = (-\Delta_{ам} + (t_{гр} - t_b)) S \eta \alpha; \quad (2)$$

$$W_{CO_2} = (-\Delta_{CO_2} + (t_{гр} - t_b)) S \eta \alpha; \quad (3)$$

для аммиака  $(t_k - t_{гр}) = -\Delta_{ам}$ , для диоксида углерода  $(t_k - t_{гр}) = -\Delta_{CO_2}$ .

Величины  $\Delta_{CO_2}$ ,  $\Delta_{ам}$  вычисляются по формуле [Аникин, Спасенникова, 2014]

$$\Delta_{CO_2/ам} = \frac{\rho_L g H}{dP_{нас}/dt},$$

где  $\rho_L$  – плотность жидкого хладагента при данной температуре;  $g$  – ускорение свободного падения;  $P_{нас}$  – давление насыщенных паров при данной температуре;  $H$  – высота подъема конденсатора над испарителем.

Разделив (3) на (2), получим

$$\frac{W_{CO_2}}{W_{ам}} = \left[ 1 - \frac{\Delta_{CO_2}}{t_{гр} - t_b} \right] \left[ 1 - \frac{\Delta_{ам}}{t_{гр} - t_b} \right]^{-1}.$$

Для замораживания грунта должно выполняться условие  $t_b < t_{гр}$ .

В таблице приведены значения отношений мощностей для углекислоты и аммиака при различных температурах конденсатора, разности температур грунта и воздуха и расстояния между испарителем и конденсатором.

Как видно из таблицы, если установка работает и на углекислоте, и на аммиаке, то мощность этой установки на углекислоте всегда больше мощности установки на аммиаке.

### ВЫВОДЫ

Показано, что мощность установки “ГЕТ”, работающей на углекислоте, всегда выше, чем мощность той же установки, работающей на аммиаке. Это связано в первую очередь с тем, что производная насыщенных паров по температуре для углекислоты всегда выше, чем для аммиака. Поэтому с увеличением расстояния между испарителем и конденсатором (с ростом гидростатического давления) отношение гидростатического давления к производной давления насыщенных паров по температуре для углекислоты также всегда меньше, чем для аммиака.

С увеличением температуры конденсатора область, в которой установка не работает с углекислотой и аммиаком, уменьшается. Установка на углекислоте работает при большем расстоянии между конденсатором и испарителем при разности температур грунта и воздуха 1 °С, в то время как на аммиаке она вообще не работает.

Работа выполнена в рамках госзадания НИОКТР (АААА-17-117051850061-9).

### Литература

Аникин Г.В. Компьютерное моделирование работы систем горизонтального охлаждения грунтов. М., 2009. Деп. в ВИНТИ 30.10.2009, № 674-В2009.

**Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А.** Компьютерное моделирование тепломассопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 33–39.

**Аникин Г.В., Спасенникова К.А.** О выборе хладагента для сезонных охлаждающих устройств типа "ГЕТ" // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 31–33.

**Мельников В.П., Аникин Г.В., Ишков А.А. и др.** Параметры верхних и нижних тепловых нагрузок, ограничивающих функционирование горизонтальной естественно действующей трубчатой системы // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 41–48.

### References

Anikin G.V. Komp'yuternoe modelirovanie raboty hermo gorizontalnogo okhlazhdeniya gruntov [Simulating the Operation

of Cooling Systems with Horizontal Tubes]. Moscow, 2009. Deposited at VINITI, 30.10.2009, No. 674-B2009 (in Russian).

Anikin G.V., Plotnikov S.N., Spasennikova K.A. Computer simulation of heat- mass exchange in the systems of horizontal ground cooling. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2011, vol. XV, No. 1, p. 33–39 (in Russian).

Anikin G.V., Spasennikova K.A. On the choice of refrigerating fluid type "GET" systems for seasonal cooling. Earth's Cryosphere, 2014, vol. XVIII, No. 2, p. 26–28.

Melnikov V.P., Anikin G.V., Ishkov A.A. et al. Maximum and minimum critical thermal loads constraining the operation of hermos-syphons with horizontal evaporator tubes (HET). Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 3, p. 38–44.

*Поступила в редакцию 24 июля 2019 г.,  
после доработки – 6 ноября 2019 г.,  
принята к публикации 19 ноября 2019 г.*